

# MgO障壁強磁性トンネル接合の高速スピン注入磁化反転とダイナミクス

著者	青木 達也
号	54
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4285号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/61965">http://hdl.handle.net/10097/61965</a>

	あおき たつ や
氏 名	青木 達也
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成22年 3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 応用物理学専攻
学位論文題目	MgO 障壁強磁性トンネル接合の高速スピン注入磁化反転とダイナミクス
指導教員	東北大学教授 安藤 康夫
論文審査委員	主査 東北大学教授 安藤 康夫 東北大学教授 佐久間 昭正 東北大学教授 北上 修

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

近年、電子の電荷に加えてスピンの自由度を積極的に活かし、新しい機能を有するデバイスを創製しようとするスピントロニクス分野が急速に認知されてきている。とりわけ、強磁性体を有するナノ構造中の、磁気モーメントの方向とスピンの偏極した電流は、相互作用を介して一方で他方を制御できる機構をもつことが注目されている。その代表例として、強磁性層/絶縁体層/強磁性層の3層構造からなる強磁性トンネル接合(magnetic tunnel junction: MTJ)に対し、面直方向に電流を流したとき、片方の強磁性層によってスピン偏極された伝導電子が、他方の強磁性層の磁気モーメントにスピン角運動量の授受を通じてトルク(spin transfer torque: STT)を与える現象が、応用の観点から着目されている。このSTTによる磁化反転をスピン注入磁化反転と呼ぶ。このスピン注入磁化反転を基本原理とした次世代メモリである、スピン注入型磁気メモリ(spin transfer random access memory: Spin-RAM)は、磁性体を情報記録に用いることによる不揮発性や書き換え耐性等の点に優れているため、既存の半導体メモリを置き換える可能性があることから注目を集めている。このような利点を活かすためには、半導体と同等の高速動作性の確保が要請されている。

本研究開始の時点では、高速スピン注入磁化反転は巨大磁気抵抗効果(giant magneto-resistance: GMR)素子の報告例に限られていた。また、MgO障壁系MTJは高い磁気抵抗比が期待されるとともに特有のスピントルク生成機構をもつことが理解されつつあったことから、MTJにおける高速スピン注入磁化反転の検証は、急務であった。さらに、スピン注入磁化反転特性を理解する上で、それに伴う磁化ダイナミクスを観測することが重要である。しかしながら、一般的に採られてきた観測手法は、多数回の磁化反転イベントをもとに磁化反転過程を再現するものに限られていた。特にスピン注入磁化反転の観測されるような微小磁性体の磁化挙動は熱励起のため強いランダム性をもつ。即ち、十分な検出性を併せ持つ単一イベントの磁化反転ダイナミクスの検出方法の確立もまた急務であった。

以上の背景の下、本論文では、MgO障壁を有するMTJについて、ナノ秒、さらにはサブナノ秒のスピン注入磁化反転を実験的に観測し、その磁化反転特性を検証することを目的とした。加えて、単一イベントの磁化反転ダイナミクスの検出方法の確立を行い、スピン注入磁化反転における磁化ダイナミクスについて議論することも目的とした。

### 第2章 実験方法

MTJ多層膜の成膜方法およびスピン注入磁化反転評価用の素子微細加工方法は以下のとおりである。CoFeB



強磁性電極および MgO 障壁層を有する MTJ 多層膜の作製には、マグネトロンスパッタ法を用いた。スピン注入評価用の素子の作製法として、電子線リソグラフィと Ar イオンミリングによる微細接合の形成、光リソグラフィ等による電極を付与する微細加工プロセスを用いた。また、強磁場中での真空中熱処理を施すことで、高い磁気抵抗比が得られるようにした。磁気抵抗特性測定には直流四端子法を、スピン注入磁化反転測定にはパルス信号源を用いた準静的方法と、単一イベントの磁化反転の時間分解測定を用いた。

### 第3章 ナノ秒領域のスピン注入磁化反転特性の検証と単一イベントの磁化反転挙動検出の試み

ナノ秒領域のスピン注入磁化反転特性の検証と単一イベントの磁化反転挙動検出について行った。MgO 障壁をもつ MTJ 多層膜について、高周波伝送路の付与されたスピン注入評価用の素子として微細加工を行い、得られた磁気抵抗比 115 %を示す素子を用いてスピン注入特性の検討を行った。

スピン注入磁化反転電流のパルス幅依存性の評価を行った。10 ns 以下の領域においては、断熱的な磁化反転モデルと傾向が一致し、反転電流  $I_C$  が大きく増大することが確認された (Figure 1)。この増大は、高周波損失では説明できず、電流により誘起される本質的な現象であることが明らかとなった。さらに、外部磁場を増加させた時の  $I_C$  の低減は、断熱モデルから予測される初期角度の増大の効果に加えてスピン注入効率の増大が大きく寄与していることが明らかとなった。即ち、初期角度の制御による  $I_C$  の低減の可能性を裏付ける結果が得られたと共に、ナノ秒領域の  $I_C$  の新たな低減機構を示した。また、スピン注入磁化反転の機構の解明のための新たな手法として、実時間測定法を提案した。本手法により、TMR 素子において実時間でのスピン注入磁化反転の検出に初めて成功した。また、同手法によって得た観測結果には熱活性の寄与が直接的に明示されており、磁化挙動の検証の観点から実時間観測法の有用性が明らかとなった。

本論文の研究目的をより一層深めて達成するために、より高速なスピン注入磁化反転特性の評価、より詳細な磁化挙動検出の実現に向けた、克服すべき実験方法上の技術的課題としては、素子の伝送特性の改善と測定方式の改善が必須である。

### 第4章 素子の高周波伝送特性と実時間測定法の検出性の改善検討

実験方法上の課題の解決に向けた検討を行った。目標として、①サブナノ秒幅のパルス電流伝送の可能な素子を作製すること、②磁化の歳差運動を含む詳細な磁化反転の観測を可能にすること、の二点に着目して検討を行った。

一つ目の目標に関連して、素子の伝送特性を低下させる因子である素子寄生容量を従来の約 250 fF から 10 fF 程へ削減するため、高精度な位置合わせ精度を有する、新しいプロセスを確立した。そのプロセスにより作製された電極構造の伝送特性評価より、当初の目標であった 10 fF 台へ寄生容量を削減できたことを確認した。またマイクロ波測定の特特性インピーダンスである 50  $\Omega$  系へ極力整合させるために、素子の低抵抗化を行い、接

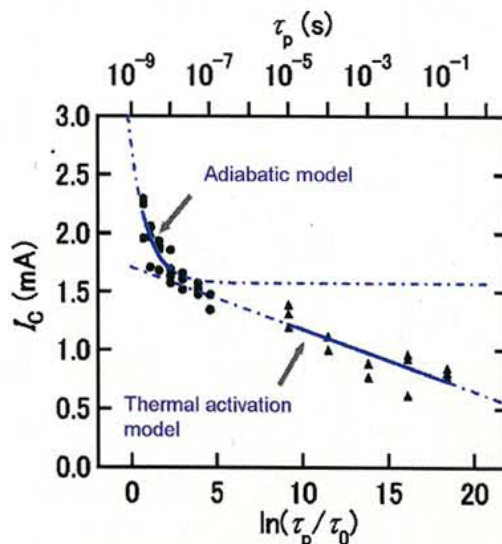


Figure 1 反転電流  $I_C$  のパルス幅  $\tau_p$  依存性. 横軸は対数スケールであり、 $\tau_0$ は $1 \times 10^{-9}$  s. プロットは実験結果、実線はfitting曲線、破線は外層線. それぞれ熱活性化領域および断熱領域について断熱(adiabatic)モデル及び熱活性化(Thermally activation)モデルによる解析.

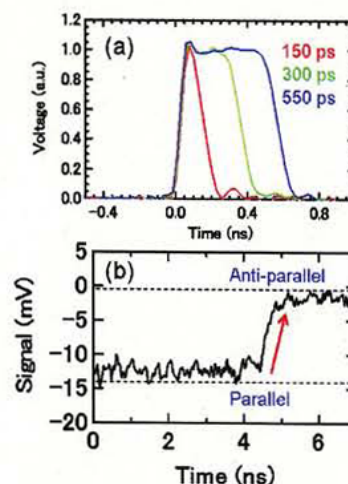


Figure 2 高速オシロスコープにて観測された、(a) 素子透過パルス電圧波形と (b) 改善された時間分解測定法による磁化反転挙動検出例. 反転過程において磁化の歳差運動が観測されている.



合面積抵抗積として  $5\ \Omega\mu\text{m}^2$  程度 (接合面積  $100\times 200\ \text{nm}^2$  換算で  $250\ \Omega$  程度) の比較的高周波計測と整合性の良い素子を得た。二つ目の目標に関連して、単一イベントの磁化反転観測のための測定系の改善を行い、従来の電圧測定方式から電流測定方式へ変更することにより、検出性の大幅な改善が可能であることを回路解析より明らかとした。

目標に対する確認のため、改善された素子及び測定回路方式を用いて、透過パルス電圧波形観測および、磁化挙動検出を行い、最速  $100\ \text{ps}$  のパルス幅に至るまでのパルス信号を素子に印加することが可能であること (Figure 2 (a))、更に磁化の歳差運動といった詳細な磁化挙動の観測が出来ること (Figure 2 (b))、を確認した。即ち、設定した目標を十分に達成することができた。

## 第5章 サブナノ秒領域のスピン注入磁化反転特性の検証

第4章の検討から得た素子作製、測定技術を駆使して、サブナノ秒領域のスピン注入磁化反転に関する検討を行った。スピン注入磁化反転における熱の影響についての詳細な検討より、サブナノ秒パルス幅領域は初期位相に現れるものを除き通電中の発熱や環境温度を無視できる、断熱モデルで説明可能な領域であることを明らかにした。またバイアス磁場の無い条件下での、スピン注入磁化反転確率のサブナノ秒パルス幅依存性においては、GMR 系ではみられていない、磁化の歳差運動を反映する顕著な周期的プラトー構造が観測された (Figure 3)。この起源の一つとして、MTJ に特有の STT の生成機構がコヒーレントで再現性ある磁化反転軌道をもたらす可能性があることを指摘した。本章では MgO 障壁を有する MTJ について、初めてサブナノ秒領域のスピン注入磁化反転の観測に成功し、磁化反転確率に反映された磁化ダイナミクスについての議論を初めて行った。

## 第6章 改善された単一イベントの磁化挙動検出による高速スピン注入磁化反転の検討

第4章の検討から得た素子作製技術、さらに単一イベントでの磁化挙動検出技術を駆使して、より詳細な磁化反転ダイナミクスの観測とその検討を行った。この検討を通じて、低電流領域での磁化の揺らぎ、スピン注入磁化反転の前後での歳差運動に起因する信号の検出に成功した。一方、他の測定手法では検出の難しい、極めて短時間 (数ナノ秒) のみ生成される、動的な磁気的中间状態 (dynamic magnetic intermediate state : DMI) の時間分解観測に初めて成功した (Figure 4)。DMI の生成条件は、電流強度に対しても敏感であり、ある電流値の下で高い生成確率をとることが明らかとなった。この DMI の有力な起源として、 $180^\circ$  に対向する磁区生成、又は Vortex 生成を挙げた。即ち、通常の単一磁区一斉回転の描像とは異なる、微細磁気構造の概念で説明される磁化反転モードの時間分解観測に成功した。

## 第7章 総括

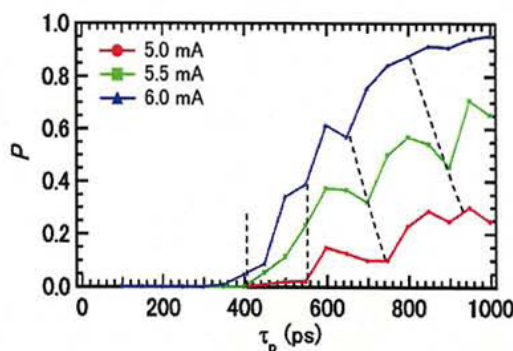


Figure 3 スピン注入磁化反転確率 ( $P$ ) のサブナノ秒パルス幅 ( $\tau_p$ ) 依存性

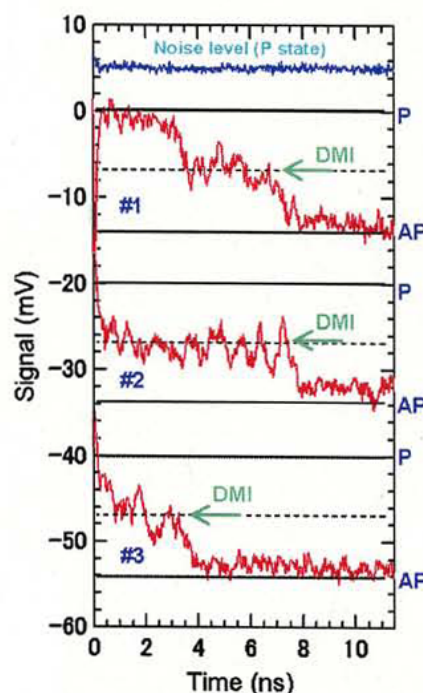


Figure 4 ある電流下での単一イベントのスピン注入磁化反転の観測例 (3イベント)。赤実線は動的磁化過程に対応、青実線はノイズレベル。平行(P)と反平行 (AP) の中間の磁化状態において、振動的挙動を示す中間状態が再現性良く観測されている。

本博士論文では MgO 障壁を有する MTJ について、ナノ秒、サブナノ秒のスピ注入磁化反転を実験的に観測すること、単一イベントの磁化反転ダイナミクスの検出方法の確立を行いスピ注入磁化反転における磁化ダイナミクスについて議論することを目的として実験を行い、以下の結論を得た。

1. ナノ秒領域のスピ注入磁化反転における反転電流と印加パルス幅の関係を明らかとし、磁化反転機構に則った反転電流の低減指針を示し実験実証を行った。また、単一イベントでのスピ注入磁化反転の時間分解観測を試み、本測定手法の有用性を初めて示した。
2. 素子の作製方法の見直しにより、素子の伝送特性を改善した。このことにより、サブナノ秒幅のパルス電流注入の可能な MTJ 素子の作製法を明らかとした。また、時間分解測定の実出性を改善し、磁化反転における歳差運動の実出を初めて可能とした。
3. MTJ を用いてサブナノ秒領域のスピ注入磁化反転の観測に初めて成功し、サブナノ秒領域における磁化反転の描像を明らかにした。また、MTJ に特異な STT 機構を反映すると考えられる磁化反転特性の観測に初めて成功した。
4. 単一イベント測定を用いることにより、微細磁気構造の概念で説明される磁化ダイナミクスの観測に初めて成功した。

本研究は、独自に考案した素子作製方法ならびに計測技術を駆使して、MgO 障壁を有する強磁性トンネル接合について、高速磁化反転領域におけるスピ注入磁化反転特性とその磁化ダイナミクスについて検証を行ったものであり、独創性の高い研究成果といえる。本研究成果は、今後の高速書き込みの可能な Spin-RAM の実現において、基礎理解を与える確かな足がかりとして大きく貢献するとともに、応用物理学の発展に寄与するものであると期待される。



# 論文審査結果の要旨

本論文では、MgO 障壁を有する MTJ について、ナノ秒、さらにはサブナノ秒のスピ注入磁化反転を実験的に観測し、その磁化反転特性を検証することを目的とした。加えて、単一イベントの磁化反転ダイナミクスの検出方法の確立を行い、スピ注入磁化反転における磁化ダイナミクスについて議論することも目的とした。

第1章は序論である。本研究を記述する上で欠かせない、強磁性トンネル接合におけるスピントルク、ナノ秒時間スケールでの高速スピ注入磁化反転に関しての物理的な背景と、研究の開始当初までの世界的な研究の状況についての記述を行った上で、研究の目的として、本研究の位置づけと研究目的について述べている。

第2章は実験方法で、強磁性トンネル接合の成膜、スピ注入磁化反転評価用の素子微細加工に関してその原理と方法について概略を述べている。また、試料の熱処理方法、測定方法についても記述されている。

第3章はナノ秒領域のスピ注入磁化反転特性の検証と単一イベントの磁化反転挙動検出の試みについて、関連の検討について記述している。まず、MgO 障壁をもつ MTJ 多層膜を 100 ナノサイズの微細接合に形成し、高周波伝送路を電極として付与することで、スピ注入評価用の素子を得ている。スピ注入磁化反転電流のパルス幅依存性の評価では、10 ns 以下の領域においては、断熱的な磁化反転モデルと傾向が一致し、反転電流が大きく増大することが確認された。また、スピ注入磁化反転のメカニズム解明のための新たな手法として、実時間測定法を提案し、本手法により、TMR 素子において実時間でのスピ注入磁化反転の検出に初めて成功している。

第4章は第3章で挙げられた実験方法上での課題を解決すべく行った検討について記述されている。設定した目標は、①サブナノ秒幅のパルス電流伝送の可能な素子を作製すること、②詳細な磁化反転挙動（歳差運動）の観測を可能にすること、の二点である。改善された素子及び測定回路方式を用いて、透過パルス電圧波形観測および、磁化挙動検出を行い、最速 100 ps のパルス幅に至るまでのパルス信号を素子に印加することが可能であること、更に磁化の歳差運動といった詳細な磁化挙動の観測が出来ること、が確認された。

第5章は第4章の検討から得た素子作製、測定技術を駆使して、サブナノ秒領域のスピ注入磁化反転に関する検討が記述されている。MgO 障壁を有する MTJ について、初めてサブナノ秒領域のスピ注入磁化反転の観測に成功し、磁化反転確率に反映された磁化ダイナミクスについての議論が述べられている。

第6章は第4章の検討から得た素子作製技術、さらに単一イベントでの磁化挙動検出技術を駆使して、より詳細な磁化反転ダイナミクスの観測をめざし、その検討の内容が記述されている。低電流領域での磁化の揺らぎ、スピ注入磁化反転の前後での歳差運動に起因する信号が検出された。一方、他の測定手法では検出の難しい、極めて短時間（数ナノ秒）のみ生成される、動的な磁気的中间状態の時間分解観測に初めて成功した。

第7章は総括である。本研究の成果は、今後の高速書き込みの可能な Spin-RAM の実現において、基礎理解を与える確かな足がかりとして大きく貢献するとともに、応用物理学の発展に寄与するものであると期待される。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。